碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能、血清生化指标、肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响[1]

马红娜　王猛强　陆　游　袁　野　孙　蓬　周歧存*

（宁波大学海洋学院鱼类营养研究室，宁波　315211）

摘　要：本试验旨在研究碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能、全鱼和肌肉常规成分、血清生化指标、肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响。采用 2×3 双因素试验设计，选取葡萄糖和小麦淀粉 2 种碳水化合物，分别设 0、15%、30% 3 个水平，共配制 5 种等氮等脂试验饲料。每种饲料饲喂 3 个重复，每个重复放养初始体重为（8.53±0.07） g 的大黄鱼 50 尾，养殖试验持续 8 周。结果表明：饲料碳水化合物种类和水平及其交互作用对大黄鱼的终末体重、增重率（WGR）、特定生长率（SGR）、饲料系数（FCR）有显著影响（$P<0.05$）。饲料葡萄糖水平 0 增加到 30%，大黄鱼的终末体重、WGR 和 SGR 显著降低（$P<0.05$）；饲料小麦淀粉水平由 0 增加到 15%时，大黄鱼的终末体重、WGR 和 SGR 显著升高（$P<0.05$），当饲料小麦淀粉水平由 15%增加到 30%时，大黄鱼的终末体重、WGR 和 SGR 显著降低（$P<0.05$）。FCR 随饲料葡萄糖水平的升高显著升高（$P<0.05$）；FCR 在饲料小麦淀粉水平由 0 增加到 15%时显著降低（$P<0.05$），由 15%增加到 30%时显著降低（$P<0.05$）。15%或 30%水平下，小麦淀粉组大黄鱼的终末体重、WGR 和 SGR 均显著高于葡萄糖组（$P<0.05$），饲料系数显著低于葡萄糖组（$P<0.05$）。在 15%水平下，葡萄糖组肌肉粗脂肪含量显著高于小麦淀粉组（$P<0.05$）；在 30%水平下，葡萄糖组肌肉粗脂肪含量显著低于小麦淀粉组（$P<0.05$）。饲料碳水化合物种类和水平的交互作用对大黄鱼血清总蛋白（TP）、总胆固醇（TC）、甘油三酯（TG）、葡萄糖含量有显著影响（$P<0.05$）。血清葡萄糖含量随饲料葡萄糖的水平升高先降低后升高，各组间差异显著（$P<0.05$）；血清葡萄糖含量随饲料小麦淀粉水平的升高逐渐降低，且 30%小麦淀粉组显著低于 0 小麦淀

收稿日期：2016-09-08

基金项目：国家自然科学基金项目（31272670）；宁波市农业科技攻关重大项目（2012C10025）；国家科技部星火重大计划项目（2014GA701001）；浙江省重中之重一级学科（水产）开放基金

作者简介：马红娜（1994—），女，山西临汾人，硕士研究生，从事水生动物营养与饲料研究。E-mail: 121848841@qq.com

*通信作者：周歧存，教授，博士生导师，E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

粉组（*P*<0.05）。饲料碳水化合物种类和水平的交互作用对大黄鱼肝脏葡萄糖激酶（GK）、6-磷酸果糖激酶（PFK）、葡萄糖-6-磷酸酶（G6Pase）活性及肝糖原含量有显著影响（*P*<0.05）。肝糖原含量随饲料葡萄糖的水平升高持续升高，而随饲料小麦淀粉水平的升高先升高后降低，且15%和30%水平下葡萄糖组均显著高于小麦淀粉组（*P*<0.05）。由此得出，与葡萄糖相比，摄食含小麦淀粉饲料的大黄鱼能够通过调节糖代谢相关酶活性及肝糖原含量来维持血糖浓度的相对恒定，且饲料中添加15%小麦淀粉时能促进大黄鱼生长。

关键词：大黄鱼；碳水化合物；生长性能；糖代谢相关酶；肝糖原

中图分类号：S963　　　　文献标识码：A　　　　文章编号：

碳水化合物是鱼类饲料中重要的能源物质，且比蛋白质和脂肪廉价[1]，饲料中添加适量的碳水化合物不仅能促进鱼类生长，还能节省饲料成本、减轻氮排泄对养殖水体的污染[2]。但饲料中碳水化合物水平过高却会抑制鱼类的生长、降低饲料利用率、减弱鱼体抗病力、提高死亡率[3-4]。鱼类对碳水化合物的利用能力与葡萄糖耐受能力密切相关[1]。刘泓宇等[5]的研究表明，杂食性的吉富罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）葡萄糖耐受能力最强，肉食性的卵形鲳鲹次之，肉食性的军曹鱼葡萄糖耐受能力最低。这说明肉食性鱼类对葡萄糖的利用能力较杂食性鱼类低，且鱼类对葡萄糖的利用存在着种类差异性[6-9]。鱼类对碳水化合物的利用状况也会因碳水化合物复杂程度而存在差异，研究表明石斑鱼（*Epinephelus malabaricus*）[10]、草鱼（*Ctenopharyngodon idella*）[11]、金头鲷（*Sparus aurata*）[12]等对小分子糖利用较好，胭脂鱼（*Myxocyprinus asiaticus*）[13]幼鱼、吉富罗非鱼[14]、大菱鲆（*Scophthalmus maximus*）[15]等对大分子糖利用较好，但这些研究均是在相同碳水化合物水平间的比较。研究表明，饲料碳水化合物水平可以调节鱼类肝脏糖酵解和糖异生关键酶的活性，从而调节鱼体血液中葡萄糖的含量[16]，目前在翘嘴红鲌（*Erythroculter ilishaeformis* Bleeker）[4]、大菱鲆[17]、舌齿鲈（*Dicentrarchus labrax*）[18]、瓦氏黄颡鱼（*Pelteobagrus fulvidraco*）[19]、金头鲷[12]和欧洲鳗鲡（*Anguilla anguilla*）[20]等鱼类中均有研究，通过这些酶活性的变化来探究鱼类糖代谢机制，从而解释鱼类对碳水化合物利用能力出现较大差异的原因。

大黄鱼（*Pseudosciaena crocea* Richardson）是我国传统“海洋四大经济鱼类”之一[21]，为暖温性近海中下层集群洄游性鱼类，是肉食性鱼类中营养价值较高的养殖鱼类，因肉质鲜美而颇受消费者欢迎。目前对大黄鱼的蛋白质、脂肪及氨基酸需求量，替代蛋白源，饲料原料消化率，营养成分及其风味均有研究[21-25]，而有关大黄鱼碳水化合物利用的研究[26-28]较少。鉴于此，本试验选取葡萄糖和小麦淀粉2种碳水化合物，

设计 0、15%、30% 3 个水平，研究碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能、肝脏糖代谢相关酶活性的影响，从而为大黄鱼资源节约型配合饲料的研制提供基础数据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计与饲料配制

以秘鲁鱼粉、豆粕、小麦蛋白粉为蛋白质源，鱼油、豆油、卵磷脂为脂肪源，并分别以 0、15%、30% 3 个水平的小麦淀粉或葡萄糖为糖源，配制 5 种等氮等脂饲料，试验饲料组成及营养水平见表 1。将所有固态原料粉碎后过 80 目筛，按表 1 比例混合均匀（维生素和矿物质等微量组分采用逐级扩大法混合），再加入鱼油、豆油和卵磷脂以及水混合均匀，用双螺杆挤条机[F(II)-26，华南理工大学，广州]加工制成粒径分别为 2 和 4 mm 的硬颗粒饲料，在烘箱中 90 ℃熟化 30 min，自然风干，密封保存于-20 ℃冰箱。

表 1 试验饲料组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets(air-dry basis) %

项目 Items	葡萄糖或小麦淀粉水平 Glucose or wheat starch level/%	葡萄糖 Glucose level/%		小麦淀粉 Wheat starch level/%	
	0	15	30	15	30
原料 Ingredients					
秘鲁鱼粉 Peruvian fish meal	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
豆粕 Soybean meal （溶剂萃取）(solvent extracted)	17.06	18.00	0.20	18.00	0.20
小麦蛋白粉 Wheat protein meal	7.39	6.77	18.61	6.77	18.61
葡萄糖 Glucose		15.00	30.00		
小麦淀粉 Wheat starch				15.00	30.00
鱼油 Fish oil	1.31	1.30	1.45	1.30	1.45
豆油 Soybean oil	1.31	1.30	1.45	1.30	1.45
卵磷脂 Soybean lecithin	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱 Choline chloride	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
矿物质预混料 Mineral premix1）	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
维生素预混料 Vitamin premix1）	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
纤维素 Cellulose	24.64	9.34		9.34	
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels2）					

干物质 Dry matter	89.83	89.03	89.34	88.67	91.27
粗蛋白质 Crude protein	45.44	46.07	46.55	44.45	46.90
粗脂肪 Crude lipid	9.91	10.57	10.98	10.75	10.07
粗灰分 Ash	12.15	12.59	11.40	12.25	9.87

1) 矿物质预混料和维生素预混料均参照 Mai 等[29]配制。Mineral premix and vitamin premix were prepared according to Mai et al[29].

2) 营养水平为实测值。Nutrient levels were measured values.

1.2 饲养管理

试验用大黄鱼鱼苗购自象山港湾水产苗种有限公司，养殖试验在浙江省象山县西沪港港湾鱼排上进行。正式试验前所有鱼苗先在鱼排上暂养 2 周，之后，挑选体质健壮、初始体重为（8.53±0.07） g 的大黄鱼 750 尾，随机分配于 15 个网箱（1.5 m×1.5 m×2.0 m）中，每个网箱放养 50 尾鱼。将 15 个网箱随机分为 5 组，每组 3 个网箱（重复）。试验期间每天 05:00 和 17:00 各投喂 1 次，投饲率为体重的 4%~6%。试验期间海水温度为 26.5~31.5 ℃，盐度为 19‰~25‰，溶解氧浓度不低于 7.0 mg/L。养殖试验持续 8 周。

1.3 样品采集与指标测定

养殖试验结束后将鱼捞出，并用丁香酚（1:10 000）麻醉，然后记录每个网箱的大黄鱼尾数并称量总重，用于计算增重率（WGR）、特定生长率（SGR）、成活率（SR）和饲料系数(FCR)；每个网箱随机取 3 尾鱼，装于密封袋中，用于检测全鱼常规成分；每个网箱另随机取 3 尾鱼称重、量体长，取其肝脏、内脏并称重，用于计算肥满度（CF）、肝体比（HSI）、脏体比（VSI）；每个网箱再随机取 8 尾鱼，从尾部静脉抽取血样（血样不混合），注入 1.5 mL 离心管中，4 ℃冰箱静置过夜后，3 000 r/min 离心 5 min，取上清液，每个网箱（重复）的血清进行混样后再分装至 PCR 管，置于-80 ℃冰箱备用；将上述取过血的大黄鱼解剖取肝脏，将肝脏放置于 2 mL 离心管中（每个网箱的肝脏混样，取完立即放入液氮中），用于检测肝脏葡萄糖激酶（GK）、6-磷酸果糖激酶（PFK）、丙酮酸激酶（PK）、葡萄糖-6-磷酸酶（G6Pase）、果糖-1,6-二磷酸酶（FBPase）、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶（PEPCK）活性及肝糖原含量；将上述取过肝脏的大黄鱼的背部肌肉剥离，取 30 g 左右，装于密封袋中，用于测定肌肉常规成分。

参照 AOAC（1995）[30]的方法测定饲料及大黄鱼全鱼和肌肉水分、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分含量。水分含量采用 105 ℃恒温干燥法测定，粗蛋白质含量采用 Leco

FP-528 全自动蛋白质分析仪测定，粗脂肪含量采用索氏抽提法测定，粗灰分含量采用 550 ℃马弗炉灼烧法测定。部分血清生化指标使用日立 7600-110 型全自动生化分析仪测定；肝脏代谢酶活性及血清胰岛素和胰高血糖素含量均采用上海乔杜生物科技公司生产的酶联免疫吸附试验（ELISA）试剂盒进行测定。肝糖原含量采用南京建成生物工程研究所生产的肝糖原试剂盒检测。

1.4 计算公式

增重率(%)=100×(终末总重-初始总重)/初始总重；

特定生长率(%/d)=100×(ln 终末总重-ln 初始总重)/试验天数；

成活率(%)=100×终末尾数/初始尾数；

饲料系数=(投饲总量×饲料干物质含量)/(终末总重-初始总重)；

肝体比(%)=100×肝脏重/体重；

肥满度(g/cm^3)=100×体重/体长 ^{3}；

脏体比(%)=100×内脏重/体重。

1.5 统计分析

试验数据采用 SPSS 19.0 统计软件进行分析，先进行双因素方差分析（two-way ANOVA），以检验碳水化合物种类和水平及其交互作用对各指标平均值影响的显著性。若碳水化合物水平对指标平均值有显著影响，则进行 Tukey’s 多重比较；若碳水化合物种类对指标平均值有显著影响，则进行独立样本 *t* 检验。各指标数据采用平均值±标准差（mean±SD）表示，$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结 果

2.1 碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能和形态学指标的影响

由表 2 可知，饲料碳水化合物种类和水平及其交互作用对大黄鱼的终末体重、增重率、特定生长率、饲料系数有显著影响（$P<0.05$），但对成活率、肥满度、肝体比、肥满度、脏体比无显著影响（$P>0.05$）。大黄鱼的终末体重、增重率和特定生长率随饲料葡萄糖水平的升高显著降低（$P<0.05$）；而当饲料中小麦淀粉水平由 0 增加到 15%时，大黄鱼的终末体重、增重率和特定生长率显著升高（$P<0.05$），而随饲料小麦淀粉水平由 15%的进一步增加到 30%，大黄鱼的终末体重、增重率和特定生长率显著降低（$P<0.05$）。饲料系数随饲料葡萄糖水平的升高显著升高（$P<0.05$）；而饲料系数随饲料小麦淀粉水平的升高先升高后降低，且 15%小麦淀粉组的饲料系数显著低于 0 和 30%小麦淀粉组（$P<0.05$）。在 15%或 30%水平下，

小麦淀粉组大黄鱼的终末体重、增重率和特定生长率均显著高于葡萄糖组（*P*<0.05），饲料系数则显著低于葡萄糖组（*P*<0.05）。

表 2　碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能和形态学指标的影响

Table 2　Effects of carbohydrate type and level on growth performance and morphological indices of large yellow croaker (*n*=3)

项目 Items	碳水化合物种类 Carbohydrate type	碳水化合物水平 Carbohydrate level/%			双因素方差分析 *P* 值，*P*-value of two-way ANOVA		
		0	15	30	P	C	P×C
初始体重	葡萄糖　Glucose	8.60±0.08	8.51±0.05	8.53±0.02	0.886	0.060	0.342
IBW/(g/尾)	小麦淀粉　Wheat starch	8.60±0.08	8.56±0.05	8.47±0.08			
终末体重	葡萄糖　Glucose	25.12±0.80^{c}	20.04±1.82^{b,A}	16.98±0.85^{a,A}	<0.001	<0.001	<0.001
FBW/(g/尾)	小麦淀粉　Wheat starch	25.12±0.80^{b}	33.99±0.35^{c,B}	22.836±0.21^{a,B}			
增重率	葡萄糖　Glucose	192.24±11.51^{c}	135.56±9.24^{b,A}	99.13±9.56^{a,A}	<0.001	<0.001	<0.001
WGR/%	小麦淀粉　Wheat starch	192.24±11.51^{b}	301.55±2.93^{c,B}	166.81±1.82^{a,B}			
特定生长率	葡萄糖　Glucose	1.91±0.07^{c}	1.52±0.17^{b,A}	1.23±0.09^{a,A}	<0.001	<0.001	<0.001
SGR/(%/d)	小麦淀粉　Wheat starch	1.91±0.07^{b}	2.48±0.01^{c,B}	1.75±0.01^{a,B}			
成活率	葡萄糖　Glucose	95.33±1.15	98.00±2.00	94.00±5.29	0.176	0.174	0.287
SR/%	小麦淀粉　Wheat starch	95.33±1.15	98.67±2.31	98.67±1.15			
饲料系数	葡萄糖　Glucose	1.68±0.08^{a}	2.17±0.28^{b,B}	2.95±0.11^{c,B}	<0.001	0.005	<0.001
FCR	小麦淀粉　Wheat starch	1.68±0.08^{b}	1.14±0.02^{a,A}	1.72±0.22^{b,A}			
肝体比	葡萄糖　Glucose	1.63±0.94	1.83±0.59	2.44±0.97	0.653	0.400	0.927
HSI/%	小麦淀粉　Wheat starch	1.63±0.94	2.07±0.94	1.66±0.35			
脏体比	葡萄糖　Glucose	4.94±0.98	4.61±0.73	5.22±1.04	0.273	0.519	0.661
VSI/%	小麦淀粉　Wheat starch	4.94±0.98	4.32±0.55	4.15±0.63			
肥满度	葡萄糖　Glucose	1.54±0.12	1.47±0.07	1.46±0.04	0.769	0.250	0.515
CF/(g/cm^3)	小麦淀粉　Wheat starch	1.54±0.12	1.54±0.12	1.42±0.08			

同行数据肩标不同小写字母表示同种碳水化合物不同水平组间差异显著（*P*<0.05）；同列数据肩标不同大写字母表示同一水平不同种类碳水化合物组间差异显著（*P*<0.05）。P:碳水化合物种类，C:碳水化合物水平。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts indicated significant difference among different carbohydrate level groups following the same carbohydrate type (*P*<0.05); in the same column, values with different capital letter superscripts indicated significant difference among different carbohydrate groups following the same carbohydrate level (*P*<0.05). P: carbohydrate type, and C: carbohydrate level. The same as below.

2.2　碳水化合物不同种类和水平对大黄鱼全鱼和肌肉常规成分的影响

由表 3 可知，饲料碳水化合物种类和水平的交互作用对大黄鱼全鱼和肌肉的水分、粗脂肪含量有显著影响（*P*<0.05），但对全鱼和肌肉的粗蛋白质、粗灰分

含量无显著影响（*P*>0.05）。全鱼和肌肉的粗脂肪含量随饲料小麦淀粉水平的升高而升高，30%小麦淀粉组显著高于 0 和 15%小麦淀粉组（*P*<0.05）；肌肉粗脂肪含量随饲料葡萄糖的水平升高先升高后降低，15%葡萄糖组显著高于 0 和 30%葡萄糖组（*P*<0.05）。在 15%水平下，葡萄糖组肌肉粗脂肪含量显著高于小麦淀粉组（*P*<0.05）；在 30%水平下，葡萄糖组肌肉粗脂肪含量显著低于小麦淀粉组（*P*<0.05）。

表 3　碳水化合物不同种类和水平对大黄鱼全鱼和肌肉常规成分的影响

Table 3　Effects of different carbohydrate and levels on whole body and muscle conventional components of large yellow croaker (*n*=3)

项目 Items	碳水化合物种类 Carbohydrate type	碳水化合物水平 Carbohydrate level/%			双因素方差分析 *P* 值，*P*-value of two-way ANOVA		
		0	15	30	P	C	P×C
全鱼 Whole body							
水分	葡萄糖 Glucose	76.63±0.68	74.85±0.80	77.78±0.71	0.056	0.083	<0.001
Moisture	小麦淀粉 Wheat starch	76.63±0.68	76.95±0.20	73.74±0.66			
粗蛋白质	葡萄糖 Glucose	15.57±0.46	15.39±0.48	14.79±0.67	0.353	0.301	0.226
Crude protein	小麦淀粉 Wheat starch	15.57±0.46	14.87±0.29	15.95±0.36			
粗脂肪	葡萄糖 Glucose	5.00±0.30	6.51±0.99	5.11±0.70	0.160	0.004	<0.001
Crude lipid	小麦淀粉 Wheat starch	5.00±0.30^{a}	5.08±0.25^{a}	7.75±0.51^{b}			
粗灰分	葡萄糖 Glucose	3.66±0.06	3.60±0.26	3.60±0.12	0.163	0.170	0.375
Ash	小麦淀粉 Wheat starch	3.66±0.06	3.53±0.17	3.36±0.14			
肌肉 Muscle							
水分	葡萄糖 Glucose	76.49±0.60	75.14±0.66	77.46±1.44	0.101	0.252	0.001
Moisture	小麦淀粉 Wheat starch	76.49±0.60	76.63±0.35	73.89±0.89			
粗蛋白质	葡萄糖 Glucose	17.88±0.09	17.62±0.05	17.53±0.17	0.134	0.210	0.261
Crude protein	小麦淀粉 Wheat starch	17.88±0.09	17.79±0.08	17.75±0.16			
粗脂肪	葡萄糖 Glucose	4.64±0.67^{a}	6.96±0.62^{b,B}	5.16±0.62^{a,A}	0.972	0.004	0.001
Crude lipid	小麦淀粉 Wheat starch	4.64±0.67^{a}	4.83±0.48^{a,A}	7.26±0.88^{b,B}			
粗灰分	葡萄糖 Glucose	1.37±0.08	1.33±0.08	1.39±0.09	0.449	0.667	0.516
Ash	小麦淀粉 Wheat starch	1.37±0.08	1.33±0.02	1.31±0.01			

2.3　碳水化合物种类和水平对大黄鱼血清生化指标的影响

由表 4 可知，饲料碳水化合物种类和水平的交互作用对大黄鱼血清总蛋白、总胆固醇、甘油三酯、葡萄糖含量有显著影响（*P*<0.05），但对胰岛素、胰高血糖素含量无显著影响（*P*>0.05）。血清总胆固醇含量随饲料葡萄糖水平的升高先升高后降低，30%葡萄糖组显著低于 0 和 15%葡萄糖组（*P*<0.05），且 15%葡萄糖组显著高于 15%小麦淀粉组（*P*<0.05），30%葡萄糖组显著低于 30%小麦淀粉组（*P*<0.05）。

血清甘油三酯含量随饲料葡萄糖水平的升高先升高后降低，30%葡萄糖组显著低于15%葡萄糖组（$P<0.05$）；血清甘油三酯含量随饲料小麦淀粉水平的升高先降低后升高，30%小麦淀粉组显著高于0、15%小麦淀粉组（$P<0.05$）。血清葡萄糖含量随饲料葡萄糖的水平升高先降低后升高，各组间差异显著（$P<0.05$）；血清葡萄糖含量随饲料小麦淀粉水平的升高逐渐降低，且30%小麦淀粉组显著低于0小麦淀粉组（$P<0.05$）。

表4 碳水化合物种类和水平对大黄鱼血清生化指标的影响

Table 4 Effects of carbohydrate type and level on serum biochemical indices of large yellow croaker (*n*=3)

项目 Items	碳水化合物种类 Carbohydrate type	碳水化合物水平 Carbohydrate level/%			双因素方差分析 *P* 值，*P*-value of two-way ANOVA		
		0	15	30	P	C	P×C
总蛋白	葡萄糖 Glucose	24.20±1.25	25.23±2.16	22.17±1.86	0.259	0.957	0.037
TP/(g/L)	小麦淀粉 Wheat starch	24.20±1.25	23.77±1.01	26.70±2.80			
总胆固醇	葡萄糖 Glucose	2.72±0.31^{b}	2.97±0.01^{b,B}	1.58±0.33^{a,A}	0.024	0.011	<0.001
TC/(mmol/L)	小麦淀粉 Wheat starch	2.72±0.31	2.45±0.14^{A}	2.97±0.14^{B}			
甘油三酯	葡萄糖 Glucose	2.98±0.08^{ab}	4.72±1.20^{b}	1.59±0.16^{a}	0.936	0.029	<0.001
TG/(mmol/L)	小麦淀粉 Wheat starch	2.98±0.08^{a}	2.47±0.37^{a}	3.78±0.12^{b}			
葡萄糖	葡萄糖 Glucose	5.24±0.27^{b}	4.15±0.11^{a,A}	9.04±0.05^{c,B}	<0.001	<0.001	<0.001
Glucose/(mmol/L)	小麦淀粉 Wheat starch	5.24±0.27^{b}	4.59±0.08^{ab,B}	3.99±0.65^{a,A}			
胰岛素	葡萄糖 Glucose	31.91±4.64	29.03±2.59	30.25±6.22	0.614	0.301	0.436
Insulin/(mU/L)	小麦淀粉 Wheat starch	31.91±4.64	30.64±4.45	25.51±1.39			
胰高血糖素	葡萄糖 Glucose	146.67±17.95	134.49±13.51	154.68±0.96	0.588	0.229	0.427
Glucagon/(pg/mL)	小麦淀粉 Wheat starch	146.67±17.95	138.65±2.89	141.22±0.32			

2.4 碳水化合物种类和水平对大黄鱼肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响

由表5可知，饲料碳水化合物种类和水平的交互作用对大黄鱼肝脏葡萄糖激酶、6-磷酸果糖激酶、葡萄糖-6-磷酸酶活性及肝糖原含量有显著影响（$P<0.05$），但对丙酮酸激酶、果糖-1,6-二磷酸酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性无显著影响（$P>0.05$）。肝脏葡萄糖激酶活性随饲料葡萄糖水平的升高而升高，随小麦淀粉的水平升高先升高后降低，且15%葡萄糖组显著低于15%小麦淀粉组（$P<0.05$）。肝脏6-磷酸果糖激酶活性随饲料葡萄糖水平的升高先升高后降低，随小麦淀粉水平的升高而升高（$P<0.05$），且30%葡萄糖组显著低于30%小麦淀粉组（$P<0.05$）。肝脏丙酮酸激酶活性随饲料小麦淀粉水平的升高先降低后升高，且15%小麦淀粉显著低于0和30%小麦淀粉组（$P<0.05$）。肝脏葡萄糖-6-磷酸酶活性随饲料葡萄糖水平的升高先稍有

降低而后显著升高（P<0.05），随小麦淀粉水平的升高先显著升高（P<0.05）后保持平稳。肝糖原含量随饲料葡萄糖水平的升高显著升高（P<0.05），而当饲料小麦淀粉水平由 0 增加到 15%时，大黄鱼肝糖原含量显著升高（P<0.05），当饲料小麦淀粉水平由 15%增加到 30%时，大黄鱼肝糖原含量显著降低（P<0.05），且 15%、30%葡萄糖组分别显著高于 15%、30%小麦淀粉组（P<0.05）。

表 5　碳水化合物种类和水平对大黄鱼肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响

Table 5　Effects of different carbohydrate type and level on hepatic glycometabolism-related enzyme activities and hepatic glycogen content of large yellow croaker

(n=3)

项目 Items	碳水化合物种类 Carbohydrate type	碳水化合物水平 Carbohydrate level/%			双因素方差分析 *P* 值，*P*-value of two-way ANOVA		
		0	15	30	P	C	P×C
葡萄糖激酶 GK/(mU/g)	葡萄糖 Glucose	120.33±8.34^{a}	133.94±12.81^{a,A}	180.75±11.65^{b}	<0.001	<0.001	<0.001
	小麦淀粉 Wheat starch	120.33±8.34^{a}	198.31±1.28^{b,B}	184.14±1.69^{b}			
6-磷酸果糖激酶 PFK/(U/g)	葡萄糖 Glucose	1 382.45±109.68^{a}	1 717.40±69.17^{b}	1 634.39±22.90^{b,A}	<0.001	<0.001	<0.001
	小麦淀粉 Wheat starch	1 382.45±109.68^{a}	1 913.72±181.43^{b}	2 463.59±64.70^{c,B}			
丙酮酸激酶 PK/(mU/g)	葡萄糖 Glucose	45.33±2.57	31.75±9.68	37.53±4.80	0.137	0.002	0.265
	小麦淀粉 Wheat starch	45.33±2.57^{b}	33.58±2.42^{a}	46.72±2.82^{b}			
葡萄糖-6-磷酸酶 G6Pase/(U/g)	葡萄糖 Glucose	65.07±1.86^{a}	64.24±2.83^{a}	82.26±7.90^{b}	0.056	<0.001	0.014
	小麦淀粉 Wheat starch	65.07±1.86^{a}	80.51±7.12^{b}	80.51±3.70^{b}			
果糖-1,6-二磷酸酶 FBPase/(U/g)	葡萄糖 Glucose	14.07±2.93	14.25±2.90	16.02±2.45	0.620	0.551	0.553
	小麦淀粉 Wheat starch	14.07±2.93	16.97±3.21	15.31±2.32			
磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶 PEPCK/(U/g)	葡萄糖 Glucose	9.68±1.79	11.83±1.84	12.70±1.27	0.469	0.059	0.854
	小麦淀粉 Wheat starch	9.68±1.79	11.15±1.86	11.63±1.27			
肝糖原 Hepatic glycogen/(mg/g)	葡萄糖 Glucose	42.65±2.59^{a}	63.72±1.80^{b,B}	74.25±2.92^{c,B}	<0.001	<0.001	0.002
	小麦淀粉 Wheat starch	42.65±2.59^{a}	53.91±12.11^{b,A}	45.49±3.39^{a,A}			

3 讨 论

3.1 碳水化合物种类和水平对大黄鱼生长性能和形态学指标的影响

碳水化合物对于鱼类的成活和生长并非必需的，鱼类摄食不含碳水化合物的饲料也能正常生长[31]。在本试验中，含 15%小麦淀粉饲料更有利于大黄鱼生长，表明适宜的饲料碳水化合物水平能促进鱼类生长[2]。本研究结果表明大黄鱼对小麦淀粉的利用能力要高于葡萄糖，这一结果与李弋等[28]的研究结果相同。然而，一些研究结果表明鱼类对葡萄糖的利用能力好于淀粉等多糖[11-12,32]。在青鱼的研究中发现分别用 20%和 40%的葡萄糖和小麦淀粉进行 16 周的投喂后增重率各组之间无显著差异[33]；在石斑鱼的研究中也发现同样的结果，即石斑鱼对小麦淀粉和葡萄糖的利用效果无显著差异[10]。本试验结果与以上研究者的研究结果不相同，这可能是由于不同鱼类对碳水化合物的利用能力不同所致[34]。肝脏是机体的重要代谢器官，鱼类吸收的碳水化合物很大一部分转化为脂肪积累在肝脏中[35]，因此鱼类摄食含高水平碳水化合物的饲料后肝体比会上升[33,36]，但本试验中发现碳水化合物水平对肝体比无显著影响，这与王猛强等[26-27]的研究结果一致。究其原因，可能是大黄鱼利用碳水化合物合成脂肪并在肝脏中沉积的能力较低。本试验中，同一水平下，葡萄糖组大黄鱼的饲料系数显著高于小麦淀粉组，表明小麦淀粉组大黄鱼的饲料转化率较高，即大黄鱼对小麦淀粉的利用效果更好。

3.2 碳水化合物种类和水平对大黄鱼全鱼和肌肉常规成分的影响

有研究表明，饲料碳水化合物水平对鱼类粗脂肪含量的影响显著，而对鱼类水分、粗蛋白质、粗灰分含量的影响均不显著[37-38]，本试验结果与之相似。本试验结果发现，大黄鱼全鱼和肌肉粗脂肪含量与小麦淀粉水平呈正相关，这与在鲤鱼[39]、尼罗罗非鱼（*Oreochromis niloticus* L.）[40]、南方鲇[41]、军曹鱼（*Rachycentron canadum* L.）[42]、翘嘴红鲌[43]中的研究结果相似，说明饲料碳水化合物水平的升高加快碳水化合物转化为脂肪，从而使得鱼体粗脂肪含量升高。另一些研究发现，随饲料碳水化合物水平的升高，非洲鲇（*Clarias gariepinus*）[37]、星斑川碟（*Platichthys stellatus*）[38]、黄鳍鲷（*Sparus latus*）[44]鱼体粗脂肪含量降低，与本试验结果不一致，这可能是由于鱼体脂肪摄入量减少且不同鱼类将碳水化合物转化为脂肪的能力不同所致。脂肪是动物储存的主要能量物质，有研究表明，淀粉类多糖比单糖更易于鱼类吸收储存[32]，本试验也发现，较于葡萄糖，大黄鱼更善于将饲料中的小麦淀粉转化为脂肪储存在体内，从而促进其生长。

3.3 碳水化合物种类和水平对大黄鱼血清生化指标的影响

在正常生理状态下动物一般能使自身各项生理指标保持动态稳定，因此血液组分的变化在一定程度上能够反映动物的健康情况[45]。血清胆固醇和甘油三酯含量变化在一定程度上能够反映肝脏代谢功能[46]。在哺乳动物中发现，当肝细胞受损时，血清胆固醇含量降低[47]，且研究表明鱼类胆固醇代谢几乎与哺乳动物一样[43]。本试验发现，30%葡萄糖组血清总胆固醇含量显著低于15%葡萄糖组、30%小麦淀粉组，这与在翘嘴红鲌[43]中的研究结果一致，表明高葡萄糖水平导致大黄鱼肝脏生理机能发生了变化；30%葡萄糖组血清葡萄糖含量显著高于0、15%葡萄糖组，表明大黄鱼对葡萄糖的利用能力有限，高水平的葡萄糖会导致大黄鱼持续高血糖浓度，对生长不利；而小麦淀粉水平对血清总胆固醇含量无显著影响，且血清葡萄糖含量随小麦淀粉水平的升高而降低，在翘嘴红鲌[43]的研究中也发现血清葡萄糖含量并没有随着α-淀粉水平的升高而上升，反而在高α-淀粉水平有下降的趋势，与本研究结果相似。这一方面可能是因为经过8周的饲养，大黄鱼对小麦淀粉出现了代谢适应，能够有效利用小麦淀粉，从而在摄食高水平小麦淀粉饲料时表现良好的生长状况；另一方面可能是因为对于淀粉等大分子糖类，大黄鱼消化吸收速率较慢，鱼体内的糖代谢相关酶的活化与葡萄糖的吸收速率达到同步，从而缓解了高水平葡萄糖对鱼体造成的不利影响；此外，这也可能是由于当鱼体摄入含中等水平的小麦淀粉饲料时，鱼体仅表现为血清葡萄糖和肝糖原含量的增高，但是当摄入高水平的小麦淀粉饲料时，鱼体相对增高了血清葡萄糖和肝糖原含量，同时也增高了体内脂肪的合成和累积率，从而使鱼体的血清葡萄糖和肝糖原含量保持在一定的阀值内[41]，因此出现本试验的结果，但具体原因仍需进一步探究。胰岛素是唯一能降低血液葡萄糖含量的激素。本试验发现，碳水化合物种类和水平对大黄鱼血清胰岛素含量无显著影响，表明鱼类胰岛素的分泌与饲料碳水化合物种类和水平无关[7]，对血液葡萄糖含量的调节主要依赖肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量。

3.4 碳水化合物种类和水平对大黄鱼肝脏糖代谢相关酶活性及肝糖原含量的影响

葡萄糖激酶、6-磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶、葡萄糖-6-磷酸酶、果糖-1,6-二磷酸酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶是糖酵解和糖异生途径中的关键酶。本试验结果表明，升高饲料碳水化合物水平能够诱导肝脏葡萄糖激酶、6-磷酸果糖激酶活性的提高。在舌齿鲈[18]的研究中发现升高饲料淀粉水平使肝脏 6-磷酸果糖激酶活性降低，但在瓦氏黄颡鱼[19]、大菱鲆[17]的研究中发现碳水化合物水平对肝脏 6-磷酸果糖激酶活性无显著

影响，表明不同鱼类对碳水化合物的代谢能力不同。研究发现，杂交罗非鱼（*Oreochromis niloticus*×*O.aureus*）幼鱼的肝脏6-磷酸果糖激酶活性在淀粉组较葡萄糖组高[48-49]，与本试验结果一致，表明肝脏6-磷酸果糖激酶活性随饲料碳水化合物结构复杂程度增加而升高。有关碳水化合物种类和水平对鱼类肝脏丙酮酸激酶活性的影响研究结果不一致，Enes 等[50]对欧洲舌齿鲈的研究表明葡萄糖能提高肝脏丙酮酸激酶活性，而 Tan 等[51]对鲤鱼和斑点叉尾鮰的研究表明随碳水化合物水平的升高肝脏丙酮酸激酶活性降低，而本试验发现大黄鱼肝脏丙酮酸激酶活性随饲料小麦淀粉水平的升高先降低后升高，与上述结果均不同。肝脏丙酮酸激酶活性也受碳水化合物的种类的影响，如：对于欧洲舌齿鲈，葡萄糖比淀粉可诱导更高的肝脏丙酮酸激酶活性[50]，对于欧鲫和中国鲶鱼，蔗糖组比葡萄糖、糊精、淀粉组肝脏丙酮酸激酶活性明显升高[51]，但在本试验中小麦淀粉组与葡萄糖组肝脏丙酮酸激酶活性无显著差异，这与在瓦氏黄颡鱼[19]、吉富罗非鱼[14]上所得结果相似，因此饲料碳水化合物对鱼类肝脏丙酮酸激酶活性的影响有待进一步探究。本试验发现，随着饲料小麦淀粉水平的升高，肝脏葡萄糖-6-磷酸酶活性显著升高，但在舌齿鲈[18]和虹鳟[52]的研究中发现碳水化合物对其活性无显著影响，其原因可能与碳水化合物和鱼的种类有关。本研究发现，饲料碳水化合物种类和水平对大黄鱼肝脏果糖-1,6-二磷酸酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶活性无显著影响，这与对大菱鲆[17]的研究结果不同，其原因可能是不同生活习性的鱼对碳水化合物的利用能力有差异。血糖是体内糖的运输形式，糖原是体内糖的储存形式[53]。机体通过肝糖原的合成与分解来维持血糖浓度的相对恒定，研究发现鱼类摄食碳水化合物后会导致肝糖原含量增加[54]，而持续的高血糖浓度和高肝糖原含量不利于鱼类的正常代谢。在本试验中肝糖原含量并没有因小麦淀粉水平的升高而持续升高，该结果与李弋等[28]的研究结果一致，表明高小麦淀粉并没有引起大黄鱼肝糖原的过多积累，不仅能维持血糖浓度的相对恒定，而且不会损害鱼类肝脏的正常功能。

4 结　论

饲料添加15%小麦淀粉时，大黄鱼能够通过调节糖代谢相关酶活性及肝糖原含量来维持血糖浓度的平衡，并能促进大黄鱼生长；饲料添加30%小麦淀粉时，大黄鱼能够通过调节糖代谢相关酶活性及肝糖原含量来维持血糖的平衡，但对生长有一定的抑制作用。而随饲料葡萄糖水平的升高，大黄鱼通过调节肝脏葡萄糖激酶、6-磷酸果糖激酶活性及肝糖原含量仍不能维持血糖浓度的相对恒定，且大黄鱼生长严重受抑。

参考文献：

[1] 毛义波,刘泓宇,谭北平,等.饲料碳水化合物水平及饥饿处理对斜带石斑鱼生长及葡萄糖耐受能力的影响[J].水产学报,2014,38(4):550–559.

[2] 吴凡,文华,蒋明,等.饲料碳水化合物水平对奥尼罗非鱼幼鱼生长、体成分和血清生化指标的影响[J].华南农业大学学报,2011,32(4):91–95.

[3] LI X F,LIU W B,LU K L,et al.Dietary carbohydrate/lipid ratios affect stress,oxidative status and non-specific immune responses of fingerling blunt snout bream,*Megalobrama amblycephala*[J].Fish & Shellfish Immunology,2012,33(2):316–323.

[4] 戈贤平,刘波,谢骏,等.饲料中不同碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长及血液指标和糖代谢酶的影响[J].南京农业大学学报,2007,30(3):88–93.

[5] 刘泓宇,毛义波,谭北平,等.饲料糖水平对不同食性鱼类生长及葡萄糖耐受能力的影响[J].水产学报,2015,39(12):1852–1862.

[6] FURUICHI M,YONE Y.Change of blood sugar and plasma insulin levels of fishes in glucose tolerance test[J].Nippon Suisan Gakkaishi,1981,47(6):761–764.

[7] CAPILLA E,MÉDALE F,NAVARRO I,et al.Muscle insulin binding and plasma levels in relation to liver glucokinase activity,glucose metabolism and dietary carbohydrates in rainbow trout[J].Regulatory Peptides,2003,110(2):123–132.

[8] PERES H,GONÇALVES P,OLIVA-TELES A.Glucose tolerance in gilthead seabream (*Sparus aurata*) and European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J].Aquaculture,1999,179(1/2/3/4):415–423.

[9] LEGATE N J,BONEN A,MOON T W.Glucose tolerance and peripheral glucose utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*),American eel (*Anguilla rostrata*),and black bullhead catfish (*Ameiurus melas*)[J].General and Comparative Endocrinology,2001,122(1):48–59.

[10] SHIAU S Y,LIN Y H.Carbohydrate utilization and its protein-sparing effect in diets for grouper (*Epinephelus malabaricus*)[J].Animal Science,2001,73(2):299–304.

[11] TIAN L X,LIU Y J,HUNG S S O.Utilization of glucose and cornstarch by juvenile grass carp[J].North American Journal of Aquaculture,2004,66(2):141–145.

[12] ENES P,PANSERAT S,KAUSHIK S,et al.Growth performance and metabolic utilization of diets with native and waxy maize starch by gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles[J].Aquaculture,2008,274(1):101–108.

[13] 张颂.胭脂鱼幼鱼饲料中适宜碳脂比、糖源和脂肪源的研究[D].硕士学位论文.武汉:华中农业大学,2014.

[14] 吴彬,彭淇,陈斌,等.日粮中不同糖源对吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)稚鱼养殖效果与机理研究[J].海洋与湖沼,2013,44(4):1050–1055.

[15] 苗淑彦,苗惠君,聂琴,等.饲料中不同种类的碳水化合物对大菱鲆生长性能和代谢反应的影响[J].水产学报,2013,37(6):910–919.

[16] ENES P,PANSERAT S,KAUSHIK S,et al.Nutritional regulation of hepatic glucose metabolism in fish[J].Fish Physiology and Biochemistry,2009,35(3):519–539.

[17] 聂琴,苗惠君,苗淑彦,等.不同糖源及糖水平对大菱鲆糖代谢酶活性的影响[J].水生生物学报,2013,37(3):425–433.

[18] ENES P,PANSERAT S,KAUSHIK S,et al.Effect of normal and waxy maize starch on growth,food utilization and hepatic glucose metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Molecular & Integrative Physiology,2006,143(1):89–96.

[19] 张世亮.饲料中糖结构、糖水平及糖脂比对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长及糖代谢的影响[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2011.

[20] SUÁREZ M D,SANZ A,BAZOCO J,et al.Metabolic effects of changes in the dietary protein:carbohydrate ratio in eel (*Anguilla anguilla*) and trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture International,2002,10(2):143–156.

[21] 张帆.大黄鱼(*Pseudosciaena crocea* R.)脂类营养生理和饲料替代蛋白源的研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2012.

[22] 林淑琴.不同生长阶段大黄鱼的蛋白质和蛋/能比营养研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2013.

[23] 何志刚.大黄鱼(*Pseudosciaena crocea* R.)和鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)苏氨酸和苯丙氨酸营养生理研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2008.

[24] 申屠基康.大黄鱼对 21 种饲料原料表观消化率及色氨酸营养需要研究[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2010.

[25] 周飘苹,金敏,吴文俊,等.不同养殖模式、投喂不同饵料及不同品系大黄鱼营养成分比较[J].动物营养学报,2014,26(4):969–980.

[26] 王猛强,周飘苹,黄文文,等.不同蛋白质水平下葡萄糖添加水平对大黄鱼生长性能、糖酵解和糖异生关键酶活性的影响[J].动物营养学报,2015,27(8):2431–2442.

[27] 王猛强,黄文文,周飘苹,等.不同蛋白质和小麦淀粉水平对大黄鱼生长性能、糖酵解和糖异生关键酶活性的影响[J].水产学报,2015,39(11):1690–1701.

[28] 李弋,周飘苹,邱红,等.饲料中糖源对大黄鱼生长性能及消化酶、糖代谢关键酶活性的影响[J].动物营养学报,2015,27(11):3438–3447.

[29] MAI K S,WAN J L,AI Q H,et al.Dietary methionine requirement of large yellow croaker,*Pseudosciaena crocea* R[J].Aquaculture,2006,253(1/2/3/4):564–572.

[30] AOAC.Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists[S].16th ed.Arlington,VA:Association of Official Analytical Chemists,1995.

[31] NRC.Nutrient requirements of fish and shrimp[S].Washington,D.C.:National Academies Press,2011.

[32] 林小植,罗毅平,谢小军.饲料碳水化合物水平对南方鲇幼鱼餐后糖酵解酶活性及血糖浓度的影响[J].水生生物学报,2006,30(3):304–310.

[33] 蔡春芳,陈立侨,叶元土,等.日粮糖种类和水平对青鱼生长性能和生理指标的影响[J].动物营养学报,2009,21(2):212–218.

[34] 蔡春芳,陈立侨.鱼类对糖的利用评述[J].水生生物学报,2006,30(5):608–613.

[35] 田丽霞.草鱼糖代谢研究[D].博士学位论文.广州:中山大学,2002:10–44.

[36] DENG D F,REFSTIE S,HUNG S S O.Glycemic and glycosuric responses in white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) after oral administration of simple and complex carbohydrates[J].Aquaculture,2001,199(1/2):107–117.

[37] ALI M Z,JAUNCEY K.Optimal dietary carbohydrate to lipid ratio in African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell 1822)[J].Aquaculture International,2004,12(2):169–180.

[38] LEE S M,LEE J H.Effect of dietary glucose,dextrin and starch on growth and body composition of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus*[J].Fisheries Science,2004,70(1):53–58.

[39] KESHAVANATH P,MANJAPPA K,GANGADHARA B.Evaluation of carbohydrate rich diets through common carp culture in manured tanks[J].Aquaculture Nutrition,2002,8(3):169–174.

[40] GAYE-SIESSEGGER J,FOCKEN U,BECKER K.Effect of dietary protein/carbohydrate ratio on activities of hepatic enzymes involved in the amino acid metabolism of Nile tilapia,*Oreochromis niloticus* (L.)[J].Fish Physiology and Biochemistry,2006,32(4):275–282.

[41] 罗毅平.肉食性鱼类南方鲇对饲料碳水化合物营养胁迫的生理生态学反应[D].博士学位论文.重庆:西南大学,2007.

[42] REN M C,AI Q H,MAI K S,et al.Effect of dietary carbohydrate level on growth performance,body composition,apparent digestibility coefficient and digestive enzyme activities of juvenile cobia,*Rachycentron canadum* L.[J].Aquaculture Research,2011,42(10):1467–1475.

[43] 王广宇.日粮碳水化合物水平对翘嘴红鲌生长、血液指标及 *GK*、*G6Pase*、*HSC*70 基因表达的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2009.

[44] HU Y H,LIU Y J,TIAN L X,et al.Optimal dietary carbohydrate to lipid ratio for juvenile yellowfin seabream (*Sparus latus*)[J].Aquaculture Nutrition,2007,13(4):291–297.

[45] DJANGMAH J S.The effects of feeding and starvation on copper in the blood and hepatopancreas,and on blood proteins of *Crangon vulgaris* (fabricius)[J].Comparative Biochemistry and Physiology,1970,32(4):709–731.

[46] 程汉良,夏德全,吴婷婷.鱼类脂类代谢调控与脂肪肝[J].动物营养学报,2006,18(4):294–298.

[47] 阎红卫,张欣.血清总胆固醇在肝病中的应用[J].世界核心医学期刊文摘：胃肠病学分册,2006,2(2):1–3.

[48] LIN J H,SHIAU S Y.Hepatic enzyme adaptation to different dietary carbohydrates in juvenile tilapia *Oreochromis niloticus*×*O.aureus*[J].Fish Physiology and Biochemistry,1995,14(2):165–170.

[49] SHIAU S Y,LIANG H S.Carbohydrate utilization and digestibility by tilapia,*Oreochromis niloticus*×*O.aureus*,are affected by chromic oxide inclusion in the diet[J].The Journal of Nutrition,1995,125(4):976–982.

[50] ENES P,PANSERAT S,KAUSHIK S,et al.Rapid metabolic adaptation in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles fed different carbohydrate sources after heat shock stress[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Molecular & Integrative Physiology,2006,145(1):73–81.

[51] TAN Q,XIE S,ZHU X,et al.Effect of dietary carbohydrate sources on growth performance and utilization for gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) and Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther)[J].Aquaculture Nutrition,2006,12(1):61–70.

[52] PANSERAT S,MÉDALE F,BRÈQUE J,et al.Lack of significant long-term effect of dietary carbohydrates on hepatic glucose-6-phosphatase expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,2000,11(1):22–29.

[53] 李爱杰.水产动物营养与饲料学[M].北京:中国农业出版社,1996:26–36.

[54] HEMRE G I,MOMMSEN T P,KROGDAHL Å.Carbohydrates in fish nutrition:effects on growth,glucose metabolism and hepatic enzymes[J].Aquaculture Nutrition,2002,8(3):175–194.

Effects of Carbohydrate Type and Level on Growth Performance, Serum Biochemical Indices, Hepatic Glycometabolism-Related Enzyme Activities and Hepatic Glycogen Content of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea* Richardson)[2]

MA Hongna WANG Mengqiang LU You YUAN Ye SUN Peng ZHOU Qicun*

(*Laboratory of Fish Nutrition*, *School of Marine Sciences*, *Ningbo University*, Ningbo 315211, *China*)

Abstract: An 8-week feeding trial was conducted to evaluate the effects of carbohydrate type and level on growth performance, whole body and muscle conventional components, serum biochemical indices, hepatic glycometabolism-related enzyme activities and hepatic glycogen content of large yellow croaker (*Larimichthys crocea* Richardson). Five isonitrogenous and isolipidic experimental diets were formulated to contain three carbohydrate levels (0, 15% and 30%), and glucose and wheat starch were used as carbohydrate sources, respectively. Each diet was randomly assigned to 3 replicates and each replicate had 50 large yellow croakers with the initial body weight of (8.53±0.07) g. The results showed that the final body weight, weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and feed conversion ratio (FCR) were significantly affected by dietary carbohydrate type and level and their interaction (P<0.05). The final body weight, WGR

*Corresponding author, professor, E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn （责任编辑　菅景颖）

and SGR significantly decreased with dietary glucose level increasing from 0 to 30% (*P*<0.05); however, the final weight, WGR and SGR significantly increased with dietary wheat starch level increasing from 0 to 15% and then significantly decreased with dietary wheat starch level increasing from 15% to 30% (*P*<0.05). FCR significantly increased with of dietary glucose level increasing, but it significantly decreased with dietary wheat starch level increasing from 0 to 15% (*P*<0.05) and significantly increased with dietary wheat starch level increasing from 15% to 30% (*P*<0.05). Under the 15% or 30% level, fish fed the diets with wheat starch had significantly higher final body weight, WGR and SGR than those fed the diets with glucose (*P*<0.05). Under the 15% level, fish fed the diets with glucose had significantly higher crude lipid content in muscle than those fed the diets with wheat starch (*P*<0.05); however, Under the 30% level, fish fed the diets with glucose had significantly lower crude lipid content in muscle than those fed the diets with wheat starch (*P*<0.05). Total protein (TP), total cholesterol (TC), triglyceride (TG) and glucose contents in serum were significantly affected by the interaction of dietary carbohydrate type and level (*P*<0.05). Glucose content in serum was firstly decreased and then increased with dietary glucose level increasing, and the difference was significant among groups (*P*<0.05). With dietary wheat starch level increasing, glucose content in serum had a decrease trend, and it in 30% wheat starch group was significantly lower than that in 0 wheat starch group (*P*<0.05). Hepatic glucokinase (GK), phosphofructokinase (PFK) and glucose-6-phosphatase (G6Pase) activities and hepatic glycogen content were significantly affected by the interaction of dietary carbohydrate type and level (*P*<0.05). Hepatic glycogen content had a continuously increase with dietary glucose level increasing and had a trend of increased at first and then decreased with dietary wheat starch increasing. Fish fed the diets with wheat starch had significantly higher hepatic glycogen content than those fed the diets with glucose under the 15% or 30% level (*P*<0.05). These results demonstrate that compared with glucose, diet with wheat starch can make large yellow croaker has the ability to maintain a relatively constant concentration of blood glucose by adjusting hepatic glycometabolism-related enzyme activities and hepatic glycogen content, and the growth performance of large yellow croaker can be improved when the diet with 15% wheat starch.

Key words: large yellow croaker （*Larmichthys crocea* Richardson）; carbohydrate; growth performance; glycometabolism-related enzymes; hepatic glycogen